石河子市浅层地下水化学特征及其成因分析

曾小仙[1,2]， 曾妍妍[1,2]， 周金龙[1,2]， 雷 米[1,2]， 孙 英[1,2]
（1. 新疆农业大学水利与土木工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052；
2. 新疆水文水资源工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：为研究新疆石河子市地下水化学特征及成因，采用描述性统计和Piper三线图对研究区19个潜水和25个浅层承压水水样的主要离子组分含量及水化学类型进行统计分析，并运用Schoeller图、Gibbs图和离子比值图等方法分析影响研究区地下水化学特征形成的主要因素。结果表明：石河子市浅层地下水为低矿化度的弱碱性水，水化学类型以HCO_3-Ca和HCO_3·SO_4-Ca型为主，其次是HCO_3·SO_4-Na型。影响潜水水化学特征的主要是岩石风化作用和地表水蒸发浓缩后的渗透补给，影响浅层承压水水化学特征的主要因素是岩石风化作用；地下水中少量Ca^{2+}和Mg^{2+}来自碳酸盐的溶解，一部分Ca^{2+}来自硫酸盐的溶解，Na^+和Cl^-主要来自岩盐的溶解；γ(Na^+-Cl^-)与γ(Ca^{2+}+Mg^{2+})-γ(HCO_3^-+SO_4^{2+})呈负相关关系，表明阳离子交换作用也是浅层地下水中化学组分形成的重要作用之一。

关键词：浅层地下水；水化学特征；成因分析；石河子市

水化学特征是水文循环与周围环境长期作用的结果，开展地下水水化学特征及成因分析，是了解地下水补给来源和演化过程的有效方法，是了解区域地下水系统循环更新路径的重要途径，也是保护地下水水源的技术支撑[1-2]。常用的水化学特征分析方法包括分析地下水化学组分[3]，分析Piper三线图、Gibbs图和离子比值图等[1,4-8]。孙英等[4]运用Piper三线图对新疆巴楚县地下水水化学类型进行分析，Gibbs图反映蒸发浓缩、岩石风化、大气降水三者对水化学组分的影响程度，用饱和指数与TDS的比值判断在蒸发浓缩作用中矿物溶解和沉淀的趋势等分析出巴楚县平原区地下水水化学特征及成因。张涛等[5]通过数理统计、Piper三线图等分析出蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素。姜体胜等[1]采用Piper三线图、Schoeller图等分析了北京平谷平原区浅层地下水化学特征及成因。

新疆石河子市位于我国西北内陆干旱区，地下水为该区域生活生产的主要水源[9]。由于天然降水入渗和越流补给对深层承压水的影响有限，且深层水储存资源存在开采难且开采后难以恢复的问题，从经济和资源利用的角度考虑，研究区深层承压水都不适合作为常规水源去开采利用，因此，石河子市工农业生产及生活的主要水源是浅层地下水。近年来，由于经济和人口的增长，玛纳斯河水质恶化，即地下水的补给来源受到一定程度污染，加上当地的农业机井管理混乱，使上下含水层的水力联系更加频繁[10-11]。各种人为和自然因素引起地下水环境不断恶化，供需矛盾与日俱增，而进行水化学特征及成因分析，可以为合理开发水资源提供科学依据。本研究运用描述性统计、Piper三线图、Schoeller图、Gibbs图、离子比值图等方法分析石河子市浅层地下水中主要离子（K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-）的组成和来源，即研究区水化学特征及成因。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

石河子市地处天山北麓中段，古尔班通古特沙漠南缘，属于大陆性干旱气候[12]，地形总体由南向北倾斜，平均海拔450.8 m。山前带为单一的潜水含

收稿日期：2020-03-25； **修订日期：**2020-06-08
基金项目：新疆自治区自然科学基金项目（2019D01B18）；新疆自治区高校科研计划项目（XJEDU2018Y020）；国家自然科学基金项目（41662016）
作者简介：曾小仙（1996-），女，硕士研究生，主要从事水土环境地球化学方面的科研工作. E-mail: 1910169441@qq.com
通讯作者：曾妍妍. E-mail: 644257818@qq.com

水层，潜水水位埋深15~80 m，含水层岩性为卵石和砾石，单一结构潜水区总体上含水较丰富，开采利用容易。本次研究所采集的潜水样品均来自单一结构潜水含水层；单一结构潜水区以北为多层结构潜水-承压水含水层，有研究表明多层结构潜水-承压水区的潜水水质极差，一般不作为开采含水层，因此，本研究在潜水-承压水区内仅以承压水为研究对象，并根据研究区水文地质条件及当地地下水开采情况，将井深≤100 m的承压水划分为浅层承压水，浅层承压水水位埋深5~15 m，含水层上部岩性为卵砾石层，下部岩性为砾石、砂砾石或砂层[12-13]。董新光等[14]研究表明石河子市地下水补给主要依靠地表水渗漏、农田灌溉下渗和降水入渗；而地下水排泄主要通过人工开采、侧向流出等。经过十几年的发展，地下水的水化学特征和补给排泄均已发生巨大变化。

石河子市的行政面积为456.84 km^2，地下水采样点个数依据《区域地下水污染调查评价规范(DZ/T 0288-2015)》[15]进行布设，即平原区地下水采样点每100 km^{2}布设3~4个。2017年7月采集地下水水样44个，其中潜水水样19个，浅层承压水水样25个(图1)。水样的采样、保存和运输严格按照《地下水环境监测技术规范(HJ/T164-2004)》[16]进行，由新疆地矿局第二水文工程地质大队化验室对采集的地下水样品测试，其中，通过玻璃电极法现场测定

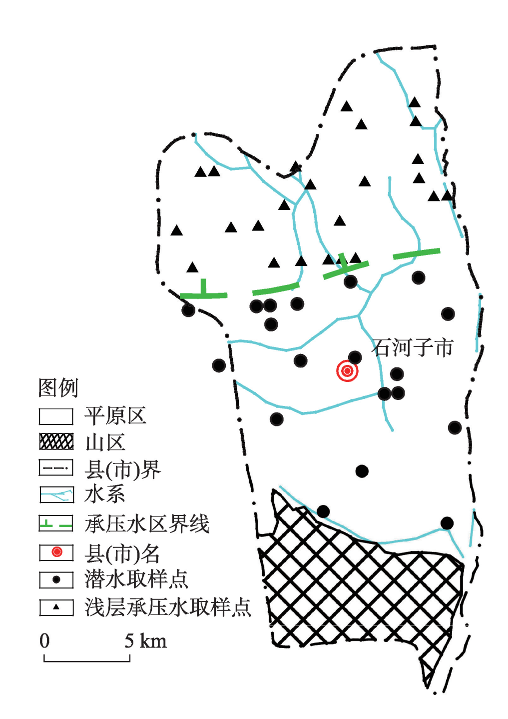


图1　地下水采样点分布示意图

Fig. 1　Distribution diagram of groundwater sampling points

pH，K^+和Na^+运用火焰原子吸收分光光度法测定，Ca^{2+}和Mg^{2+}运用乙二胺四乙酸二钠滴定法测定，Cl^-运用硝酸银容量法测定，SO_4^{2-}通过硫酸钡比浊法测定，HCO_3^-通过盐酸滴定法测定，各离子指标检出限均为0.05 mg·L^{-1}。

1.2　数据处理

水样数据的可靠性通过阴阳离子平衡检验法进行检验，通过检验得出，所有数据均为可靠数据。本文采用Excel进行描述性统计，利用Grapher和Origin软件进行图件制作。

2　地下水水化学特征

2.1　地下水化学组分统计特征

pH值是反映水文地球化学平衡信息的一个重要因子，研究区潜水pH值范围在7.27~8.34，平均值为7.91，变异系数为4.05%；浅层承压水pH值范围在7.06~8.35，平均值为7.82，变异系数为3.58%；研究区地下水主要呈弱碱性，且酸碱程度在空间上变化很小。总硬度(TH)反应了水中Ca^{2+}和Mg^{2+}浓度，研究区潜水总硬度范围在81.1~1076.0 mg·L^{-1}，平均值为273.1 mg·L^{-1}，其中软水(75 mg·L^{-1}≤TH＜150 mg·L^{-1})、微硬水(150 mg·L^{-1}≤TH＜300 mg·L^{-1})、硬水(300 mg·L^{-1}≤TH＜450 mg·L^{-1})和极硬水(TH≥450 mg·L^{-1})分别占潜水水样的15.8%、68.4%、5.3%和10.5%；浅层承压水总硬度范围在77.5~784.4 mg·L^{-1}，平均值为312.0 mg·L^{-1}，其中软水、微硬水、硬水和极硬水分别占浅层承压水水样的36.0%、12.0%、28.0%和24.0%。溶解性总固体(TDS)用于评价水中总含盐量，研究区浅层地下水的TDS范围在150.0~2400.3 mg·L^{-1}，其中淡水(TDS＜1 g·L^{-1})占90.9%，微咸水(1 g·L^{-1}≤TDS＜3 g·L^{-1})占9.1%。

通过各离子浓度均值可知：Ca^{2+}＞K^++Na^+＞Mg^{2+}，HCO_3^-＞SO_4^{2-}＞Cl^-。因此，浅层地下水中阳离子以Ca^{2+}和Na^++K^+为主，阴离子以HCO_3^-和SO_4^{2-}为主(表1)。

Schoeller图是一种传统的水化学特征图示方法，可以追溯到1962年，但是由于其操作简单并直观地展示出众多样品中主要离子的浓度变化，所以至今也是分析水化学特征的常用方法。从图2中可以看出，研究区19个潜水取样点和25个承压水取样点的水化学变化趋势都分成明显不同的两股，表明山前单一的潜水含水层和潜水以北多层机构含

表1 地下水水化学参数特征统计表

Tab. 1 Statistics of groundwater chemical parameters

地下水类型	统计值	pH	TH	TDS	K^++Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
潜水(*n*=19)	最大值/(mg·L⁻¹)	8.34	1076.0	2400.3	361.3	245.7	112.4	355.6	1121.4	366.5
	最小值/(mg·L⁻¹)	7.27	81.1	176.0	10.5	13.2	4.9	14.2	29.7	85.5
	平均值/(mg·⁻¹)	7.91	273.1	513.4	66.3	74.7	20.7	58.3	178.5	174.5
	标准差/(mg·L⁻¹)	0.32	223.06	492.03	77.19	53.15	23.47	75.88	241.98	76.67
	变异系数/%	4.05	81.68	95.84	116.43	71.15	113.38	130.15	135.56	43.94
浅层承压水(*n*=25)	最大值/(mg·L⁻¹)	8.35	784.4	1413.1	190.5	213.4	72.8	234.7	589.7	403.1
	最小值/(mg·L⁻¹)	7.06	77.5	150.0	18.5	23.5	4.8	8.5	25.0	100.7
	平均值/(mg·L⁻¹)	7.82	312.0	531.1	52.1	81.8	26.2	45.2	199.8	207.1
	标准差/(mg·L⁻¹)	0.28	214.26	341.04	42.04	56.91	20.97	47.34	168.08	94.20
	变异系数/%	3.58	68.67	64.21	80.69	69.57	80.04	104.73	84.12	45.49

注:*n*为地下水样本数。

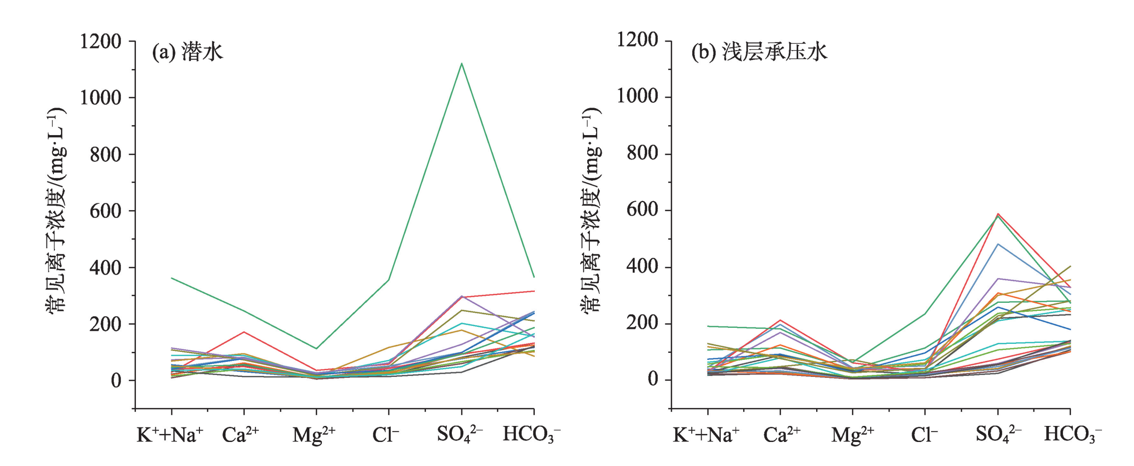


图2 地下水水化学成分Schoeller图

Fig. 2 Schoeller diagram of groundwater chemistry

水层地下水补给来源在空间上有一定差异。根据对流原理,图2中离子浓度高的样品点可能随着水流向浓度相对低的点运移。

2.2 水化学类型特征

Piper三线图是用离子所占百分比绘制的图形,可以用来直观的看出主要阴阳离子的浓度关系。从图3可以看出,研究区潜水和浅层承压水主要离子浓度的分布相近,阳离子都主要分布在靠近Ca^{2+}轴,表明Ca^{2+}占阳离子总浓度的比例较高,其次是K^++Na^+。阴离子主要分布靠近HCO_3^-轴,表明HCO_3^-占阴离子总浓度的比例较高,其次是SO_4^{2-},均远大于Cl^-。因此可以得到研究区地下水水化学类型以HCO_3–Ca、SO_4·HCO_3–Ca型为主,其次是HCO_3·SO_4–Na型。

程凡等[17]运用了舒卡列夫分类法、Piper图法对石河子市的水化学特征进行了分析,得出石河子市水化学类型主要为HCO_3–Ca、HCO_3·SO_4–Ca,表明

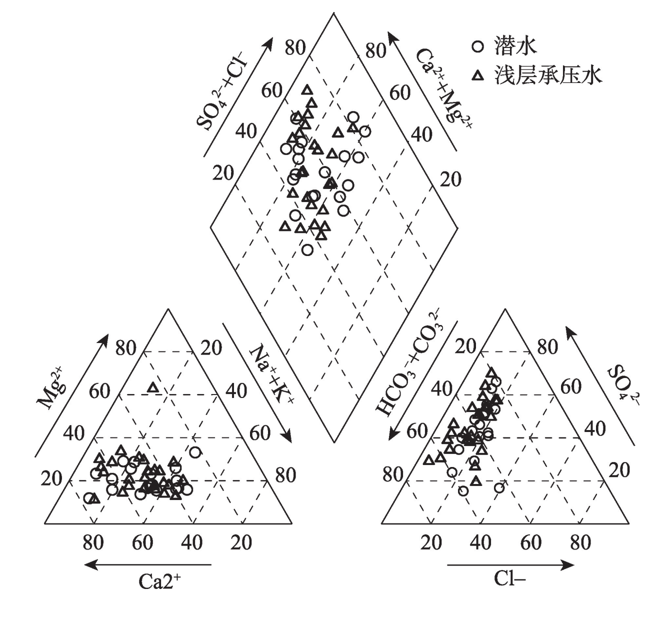


图3 地下水水化学成分Piper三线图

Fig. 3 Piper diagram of groundwater chemistry

2014—2017年间主要的地下水化学类型没有发生变化。

3 地下水水化学成因分析

3.1 蒸发浓缩作用

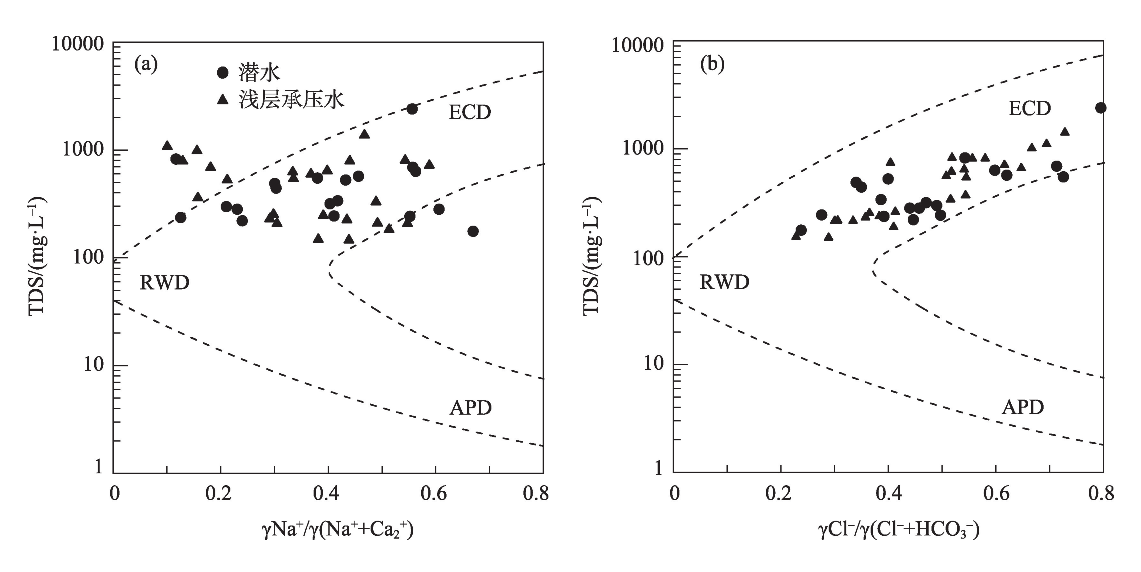
Gibbs图可以用来判断影响地下水化学类型演化机制的主要因素,一般考虑的因素有蒸发浓缩、岩石溶滤、大气降水3种[18]。石河子市地下水TDS变化范围为150.0~2400.3 mg·L^{-1},由图4可知,TDS主要集中在100~1000 mg·L^{-1}。石河子市潜水和浅层承压水样品分布特征相似,均分布在Gibbs图的中上部,董合干等[12]指出石河子地区年降水量为180~270 mm,年蒸发量为1000~1500 mm,降水量远远小于蒸发量,表明岩石风化作用和地表水蒸发浓缩后渗透补给是影响潜水水化学特征的两个主要因素,而几乎不受大气降水的影响。Gibbs图模型范围之外存在个别采样点,表明研究区地下水除了受地表水蒸发浓缩及地下水中岩石溶滤的影响,还可能受到人类活动等影响[19]。

3.2 溶滤作用

3.2.1 *矿物溶解和沉淀* 大气降水使基岩中的矿物发生淋滤作用,形成一定化学成分的地表水或基岩裂隙水,由于二氧化碳含量和水岩作用时间不同,导致碳酸盐岩和蒸发盐岩的风化程度不同,相应的地下水化学组分也发生变化[20-21]。本文采用矿物饱和指数(SI)来判断地下水中的矿物发生溶解或沉淀反应趋势。SI>0表示矿物相对水溶液处于过饱和状态,难溶物质自地下水中沉淀;SI=0表示难溶物的溶解与沉淀达到平衡;SI<0表示矿物相对水溶液未达到饱和状态,难溶物质溶于地下水。

由表2可以看出研究区方解石($CaCO_3$)、白云石[$CaMg(CO_3)_2$]、石膏($CaSO_4·2H_2O$)、岩盐(NaCl)在潜水和浅层承压水中的饱和指数平均值相近,说明山前单一的潜水含水层和潜水以北的多层结构承压含水层中主要矿物的溶解能力相近。结合表2和图5可以看出,方解石在潜水中饱和指数范围在-0.18~1.00,在浅层承压水中饱和指数范围在-0.54~1.05,90.9%的水样饱和指数>0,说明方解石相对于水溶液处于过饱和状态,自地下水中沉淀;白云石在潜水中饱和指数范围在-0.58~1.58,在浅层承压水中饱和指数范围在-1.39~1.84,79.6%的水样饱和指数大于0,说明大部分地区的白云石也处于沉淀状态;石膏和岩盐的饱和指数都小于0,说明石膏和岩盐相对水溶液未饱和,处于持续溶解的状态,尤其是岩盐的饱和指数普遍小于-6.5,溶解速度较快。从主要矿物的溶解-沉淀平衡状态来看,地下水中只有少量Ca^{2+}和Mg^{2+}来自碳酸盐的溶解,一部分Ca^{2+}来自硫酸盐的溶解,Na^+和Cl^-主要来自岩盐的溶解。

3.2.2 *基于离子比分析* 离子比值可以在一定程度上反应不同岩石风化对主要化学组分来源的影响,因此使用离子比值法进一步识别地下水化学成分来源[4,22]。在自然环境中,地下水中Na^+和Cl^-主要来



注:APD表示大气降水作用;RWD表示岩石风化作用;ECD表示蒸发浓缩作用。

图4 地下水水化学成分Gibbs图

Fig. 4 Gibbs diagram of groundwater chemistry

表2 地下水中主要矿物的饱和指数(SI)计算结果

Tab. 2 Saturation index of major minerals in groundwater

地下水类型	统计值	方解石($CaCO_3$)	白云石[$CaMg(CO_3)_2$]	石膏($CaSO_4·2H_2O$)	岩盐(NaCl)
潜水(*n*=19)	最大值/($g·L^{-1}$)	1	1.58	−0.51	−5.57
	平均值/($g·L^{-1}$)	0.46	0.68	−1.63	−7.33
	最小值/($g·L^{-1}$)	−0.18	−0.58	−2.72	−8.3
浅层承压水(*n*=25)	最大值/($g·L^{-1}$)	1.05	1.84	−0.68	−6
	平均值/($g·L^{-1}$)	0.45	0.69	−1.57	−7.48
	最小值/($g·L^{-1}$)	−0.54	−1.39	−2.52	−8.39

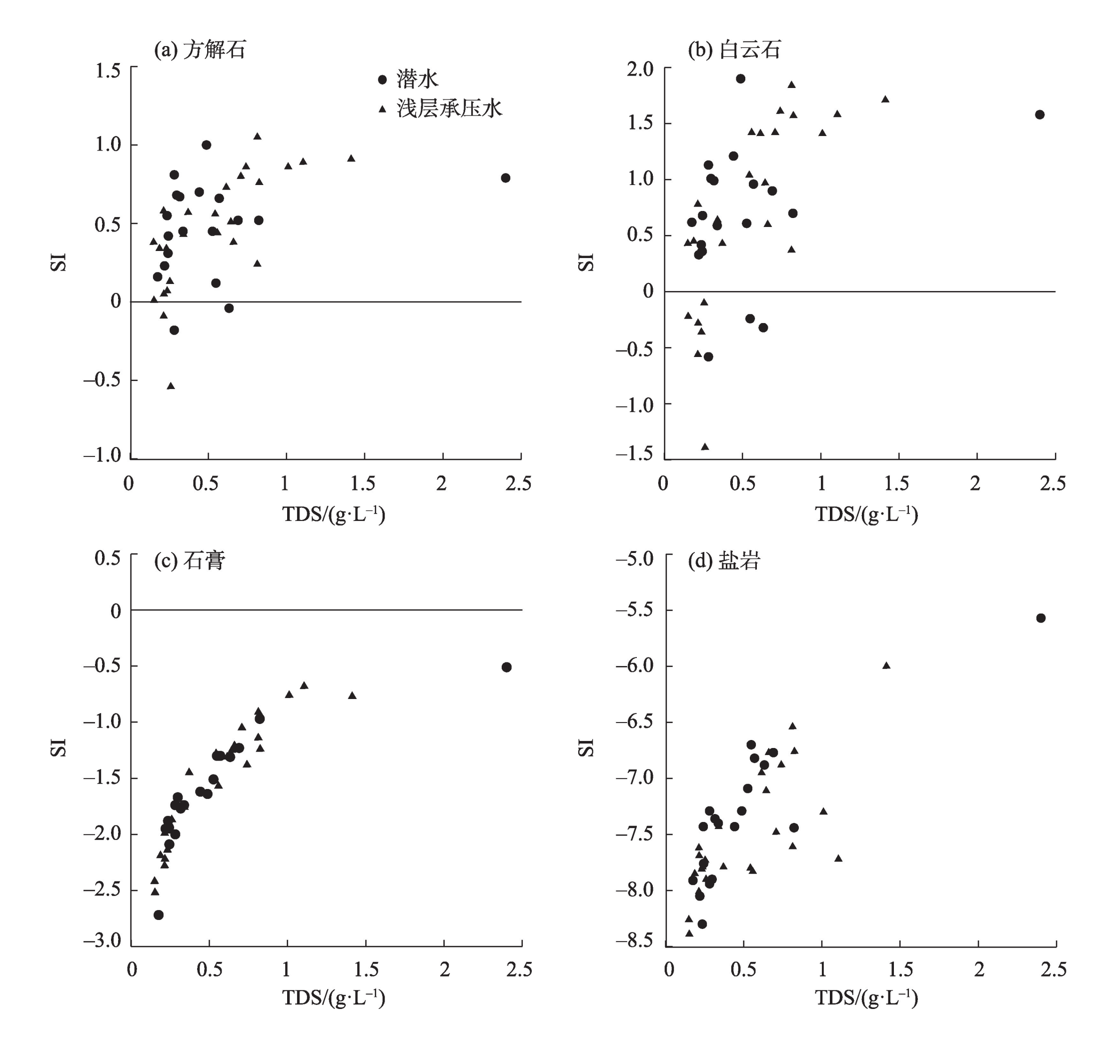


图5 地下水中主要矿物饱和指数(SI)与TDS相关关系图

Fig. 5 Relationship between saturation index of major minerals and TDS in groundwater

源于岩盐的溶解,所以$\gamma Na^+/\gamma Cl^-$一般为1[1]。当$\gamma(K^++Na^+)/\gamma Cl^->1$时,表明地下水中岩石矿物发生风化溶解,$Na^+$从岩石矿物中释放出来,$\gamma(K^++Na^+)/\gamma Cl^-<1$或接近于1时,表明矿物盐类经风化和溶滤作用两者是地下水中的化学组分形成的主要因素;当$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})>1$时,表明碳酸盐岩的溶解是地下水$Ca^{2+}$和$Mg^{2+}$的主要来源,反之,$Ca^{2+}$和$Mg^{2+}$的主要来源是蒸发岩或钙镁硅酸盐岩的溶解;当$\gamma(SO_4^{2-}+Cl^-)/\gamma HCO_3^->1$时,地下水中化学成分主要来自蒸发岩的溶解,反之,来自碳酸盐的溶解[23]。

地下水取样点多数在$\gamma(K^++Na^+)/\gamma Cl^-=1$的上方,表明研究区地下水中蒸发岩的溶解是$K^+$和$Na^+$的主要来源(图6a);多数在$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})=1$的下方,表明研究区地下水中$Ca^{2+}$和$Mg^{2+}$的主要来源是蒸发岩或钙镁硅酸盐岩的溶解(图6b);地下水取样点多数在$\gamma(SO_4^{2-}+Cl^-)/\gamma HCO_3^-=1$的上

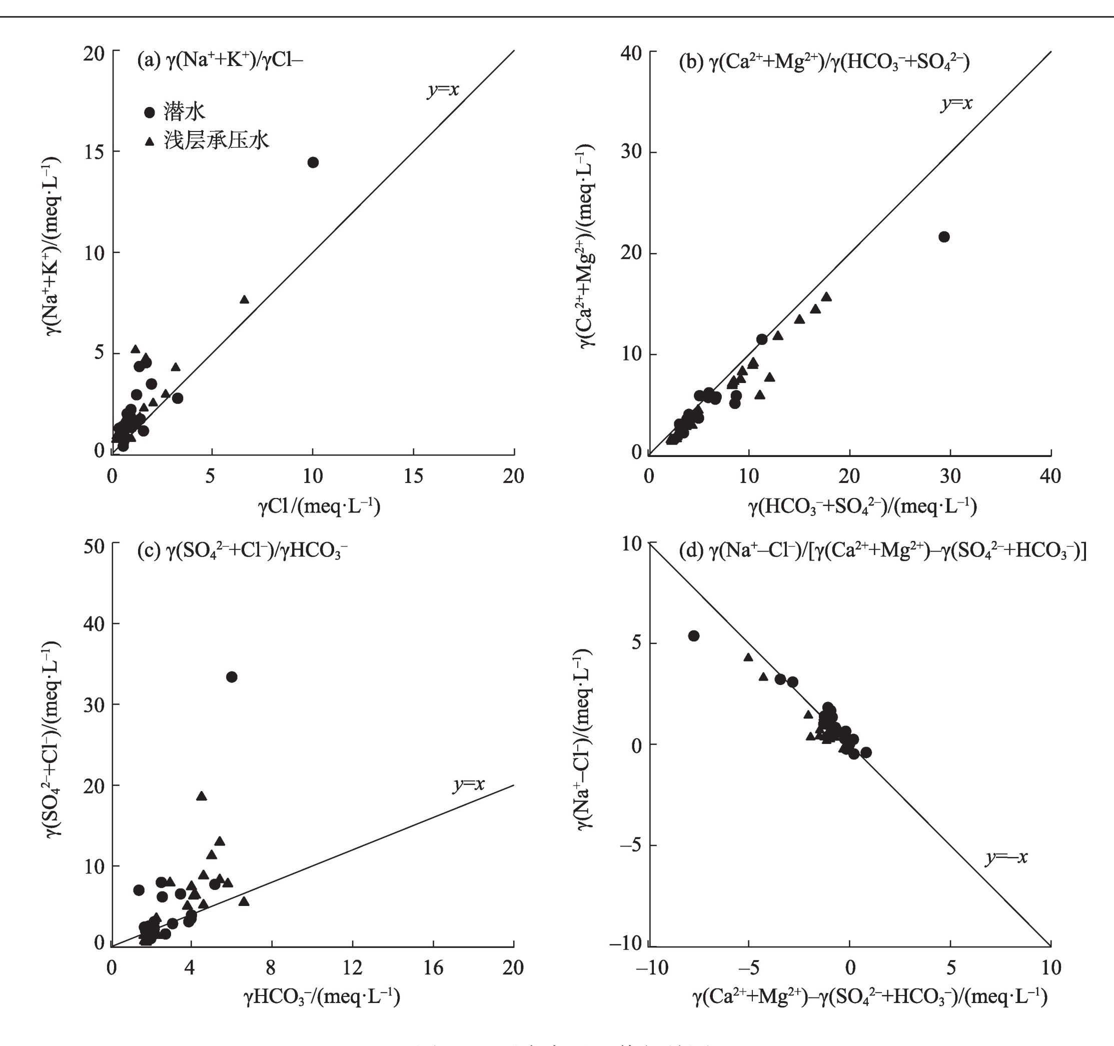


图6　地下水离子比值相关图

Fig. 6　Correlation diagram of iron ratio in groundwater

方，表明研究区地下水中化学成分主要是来自蒸发岩的溶解(图6c)。综上所述，研究区地下水离子来源于蒸发岩、钙镁硅酸盐岩的溶解。

3.3　阳离子交换作用

研究表明当γ(Na^+–Cl^-)与γ(Ca^{2+}+Mg^{2+})–γ(HCO_3^-+SO_4^{2-})为负相关关系时，地下水中将发生阳离子交换作用[24]。地下水取样点γ(Na^+–Cl^-)/[γ(Ca^{2+}+Mg^{2+})–γ(HCO_3^-+SO_4^{2-})]=–1，呈显著的负相关关系，表明研究区地下水发生了阳离子交换作用(图6d)。

3.4　人类活动影响

根据TDS划分，1987年石河子市主要开采层地下水主要为淡水和微咸水，2017年石河子市浅层地下水中淡水(TDS < 1 g·L^{-1})占90.9%，TDS变化不大。1987年石河子市主要开采层地下水中SO_4^{2-}和NO_3^-平均含量分别为89.7 mg·L^{-1}和6.62 mg·L^{-1}，2017年石河子市浅层地下水中SO_4^{2-}和NO_3^-平均含量分别为190.6 mg·L^{-1}和12.2 mg·L^{-1}，表明1987—2017年，浅层地下水中SO_4^{2-}和NO_3^-平均含量呈明显上升趋势[25]。这是由于石河子市工业发展区废污水的入渗补给导致地下水主要开采层的SO_4^{2-}含量升高显著；而耕地和农田区域施用的大量农药和化肥、工业污水和生活污水等对地下水化学成分形成不同程度的影响，氮肥中的大量氮元素不能被农作物及时吸收或被土壤胶体吸附，随着土壤水下渗导致NO_3^-含量上升明显[17]。

4　结 论

(1) 研究区山前带为单一结构潜水含水层，单一结构潜水区以北为多层结构承压含水层。浅层地下水(单一结构潜水和浅层承压水)为低矿化度的弱碱性水，阳离子主要以Ca^{2+}和Na^++K^+为主，阴离子主要以HCO_3^-和SO_4^{2-}为主，水化学类型以HCO_3–Ca、HCO_3·SO_4–Ca型为主。

（2）影响研究区潜水水化学特征的主要是岩石风化作用和地表水蒸发浓缩后渗透补给两个因素，影响浅层承压水水化学特征的主要因素是岩石风化作用。浅层地下水中的主要离子来源于蒸发岩的溶解，Na^+和Cl^-主要来自岩盐的溶解，只有少量Ca^{2+}和Mg^{2+}来自碳酸盐的溶解，一部分Ca^{2+}来自硫酸盐的溶解。

参考文献(References)：

[1] 姜体胜, 曲辞晓, 王明玉, 等. 北京平谷平原区浅层地下水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11): 122–127. [Jiang Tisheng, Qu Cixiao, Wang Mingyu, et al. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater and the origin in the Pinggu plain, Beijing[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(11): 122–127.]

[2] 王礼恒, 董艳辉, 宋凡, 等. 甘肃石油河流域地下水补给来源与演化特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 54–61. [Wang Liheng, Dong Yanhui, Song Fan, et al. Recharge sources and hydrogeochemical properties of groundwater in the Shiyou River, Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 54–61.]

[3] 史箫笛, 康小兵, 许模, 等. 川滇高原斜坡地带峡谷区岩溶水化学特征及演化规律[J]. 地质学报, 2019, 93(11): 2975–2984. [Shi Xiaodi, Kang Xiaobing, Xu Mo, et al. Hydrochemical characteristics and devolution laws of karst groundwater in the slope zone of the canyon area, Sichuan-Yunnan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(11): 2975–2984.]

[4] 孙英, 周金龙, 魏兴, 等. 巴楚县平原区地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境化学, 2019, 38(11): 2601–2609. [Sun Ying, Zhou Jinlong, Wei Xing, et al. Hydrochemical characteristics and cause analysis of groundwater in the plain area of Bachu County[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(11): 2601–2609.]

[5] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 4981–4990. [Zhang Tao, He Jin, Li Jingjie, et al. Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River Basin[J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 4981–4990.]

[6] 任晓辉, 吴玺, 高宗军, 等. 酒泉东盆地地下水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 109–116. [Ren Xiaohui, Wu Xi, Gao Zongjun, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanisms of groundwater in Jiuquan East basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(10): 109–116.]

[7] 雷米, 周金龙, 吴彬, 等. 新疆昌吉州东部平原区地下水水文地球化学演化分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 105–115. [Lei Mi, Zhou Jinlong, Wu Bin, et al. Hydrogeochemical evolution process of groundwater in the eastern plains in Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 105–115.]

[8] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5428–5439. [Liu Jiangtao, Cai Wutian, Cao Yueting, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5428–5439.]

[9] 杨春, 康宏, 马超. 新疆主要城市集中式饮用水源地水质评价[J]. 干旱环境监测, 2008, 22(3): 140–147. [Yang Chun, Kang Hong, Ma Chao. Water quality assessment for urban drinking water sources of main cities in Xinjiang[J]. Arid Environmental Monitoring, 2008, 22(3): 140–147.]

[10] 郭勇. 新疆玛纳斯河流域水资源利用与管理[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(7): 81–82. [Guo Yong. Water resources utilization and management in the Manas River Basin of Xinjiang[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2013, 19(7): 81–82.]

[11] 李巧, 周金龙, 高业新, 等. 新疆北部平原区2003—2011年地下水水质变化特征[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 124–134. [Li Qiao, Zhou Jinlong, Gao Yexin, et al. Variations of groundwater quality in 2003–2011 in the plain area of north Xinjiang, China[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 124–134.]

[12] 董合干, 王栋, 王迎涛, 等. 新疆石河子地区棉田地膜残留的时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 182–186. [Dong Hegan, Wang Dong, Wang Yingtao, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of mulch residues in cotton field in Shihezi, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 182–186.]

[13] Zeng Y Y, Zhou Y Z, Zhou J L, et al. Distribution and enrichment factors of high arsenic groundwater in inland arid area of P. R. China: A case study of the Shihezi area, Xinjiang[J]. Exposure and Health, 2018, 10: 1–13.

[14] 董新光, 邓铭江. 新疆地下水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005. [Dong Xinguang, Deng Mingjiang. Groundwater Resources of Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Press, 2005.]

[15] 国土资源部. 区域地下水污染调查评价规范(DZ/T 0288–2015)[S]. 2015. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification for Regional Groundwater Contamination Investigation and Evaluation(DZ/T 0288–2015)[S]. 2015.]

[16] 中国环境监测总站, 浙江省环境监测中心站. 地下水环境监测技术规范(HJ/T 164–2004)[S]. 2004. [China National Environmental Monitoring Centre, Zhejiang Environmental Monitoring Center Station. Technical Specifications for Environmental Monitoring of Groundwater(HJ/T 164–2004)[S]. 2004.]

[17] 程凡. 石河子市地下水环境演化与水文地球化学模拟[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015. [Cheng Fan. Evolution of Groundwater Environment and Hydrogeochemical Simulation of Shihezi City[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.]

[18] 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4042–4051. [Wei Xing, Zhou Jinlong, Nai Weihua, et al. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang[J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 4042–4051.]

[19] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 等. 重庆岩溶地下河水文地球化学特征及环境意义[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 628–636. [Pu Junbing, Yuan Daoxian, Jiang Yongjun, et al. Hydrogeochemistry and

environmental meaning of Chongqing subterranean karst streams in China[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(5): 628−636.]

[20] 陈功新, 张文, 刘金辉, 等. 中国西北中小型盆地天然地下水水化学特征——以公婆泉盆地为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(6): 812−817. [Chen Gongxin, Zhang Wen, Liu Jinhui, et al. Study on chemical properties of natural groundwater in moderate-small basins in Northwest China: A case study in the Gongpoquan Basin [J]. Arid Zone Research, 2008, 25(6): 812−817.]

[21] 任孝宗, 李建刚, 刘敏, 等. 浑善达克沙地东部地区天然水体的水化学组成及其控制因素[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 791−800. [Ren Xiaozong, Li Jiangang, Liu Min, et al. Hydrochemical composition of natural waters and its affecting factors in the East Hunshandak Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 791−800.]

[22] 刘永林, 雒昆利, 李玲, 等. 新疆天然水化学特征区域分异及其地质成因[J]. 地理科学, 2016, 36(5): 794−802. [Liu Yonglin, Luo Kunli, Li Ling, et al. Regional differences and geological causes of hydrochemistry of natural water in Xinjiang, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(5): 794−802.]

[23] 章光新, 邓伟, 何岩, 等. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 20−28. [Zhang Guangxin, Deng Wei, He Yan, et al. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 20−28.]

[24] 赵江涛. 新疆焉耆盆地平原区地下水化学特征及演化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016. [Zhao Jiangtao. Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Plain Area of Yanqi Basin of Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.]

[25] 周金龙. 新疆维吾尔自治区石河子市城市地质勘查环境地质报告[R]. 昌吉: 新疆地质矿产局第二水文地质工程地质大队, 1990. [Zhou Jinlong. Environmental Geological Report on Urban Geological Exploration in Shihezi City, Xinjiang Uygur Autonomous Region[R]. Changji: No. 2 Hydrogeology and Engineering Geology Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, 1990.]

Hydrochemical characteristics and cause analysis of the shallow groundwater in Shihezi City

ZENG Xiaoxian[1,2], ZENG Yanyan[1,2], ZHOU Jinlong[1,2], LEI Mi[1,2], SUN Ying[1,2]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: We studied the groundwater hydrochemical characteristics from the Shihezi City, Xinjiang. We used descriptive statistics and trilinear diagrams of Piper to analyze the main groundwater chemical contents and hydrochemical types of 19 phreatic groundwater and 25 shallows confined to groundwater samples. We used Schoeller diagram, Gibbs diagram and ion ratio diagram to analyze the causes of groundwater chemical characteristics formation. The shallow groundwater had weak alkaline water with low salinity, and the total groundwater hardness was 68.4%. The groundwater total dissolved solids were 97.7% in fresh groundwater. The main cations were Ca^{2+} and $Na^{+}+K^{+}$, and the main anions were HCO_3^- and SO_4^{2-}. The groundwater recharge sources were different in space, and ions might migrate from relatively high concentration points to relatively low concentration points along the groundwater flow direction. The primary groundwater hydrochemical types were HCO_3−Ca and $HCO_3 \cdot SO_4$−Ca, followed by $HCO_3 \cdot SO_4$−Na. The Gibbs diagram results showed that the phreatic groundwater was mainly affected by both rock weathering and infiltration recharge after evaporation-concentration of surface water, while shallow confined groundwater was affected primarily by rock weathering. The saturation index method and ion ratio diagram indicated that the main ions in groundwater originated from the dissolution of evaporite. The dissolution of halite was the primary source of K^+ and Na^+ in groundwater, and the dissolution of evaporite or calcium magnesium silicate was the main source of Ca^{2+} and Mg^{2+}. There was a negative correlation between $\gamma(Na^+-Cl^-)$ and $\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})-\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})$, indicated that cation exchange also played an essential role in the hydrochemical formation of shallow groundwater. Shihezi City is a typical oasis city in the Northwest arid region. Our results revealed the formation mechanism of shallow groundwater and provided a scientific basis for the rational development and utilization of shallow groundwater and water treatment.

Keywords: shallow groundwater; hydrochemical characteristics; cause analysis; Shihezi City